

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Митної справи, матеріалів та технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра Матеріалознавства

(повна найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»
ВПЛИВ ДІЇ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ
СТРУКТУРУВАННЯ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ /
THE INFLUENCE OF PHYSICAL FIELD ON THE
INTENSITY OF STRUCTURING EPOXYCOMPOSITES

спеціальність 132 «Матеріалознавство»

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Матеріалознавство»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи Мм-21

Котович Роман Ігорович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Боярська Інна Володимирівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 20__ р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

Мельничук Микола Дмитрович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Імбирович Н.Ю.

“___” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Котович Роман Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Вплив дії фізичних полів на інтенсивність
структурування епоксикомпозитів*

керівник роботи *Боярська Інна Володимирівна, к.т.н., доцент*,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “05” 06 2025 року №02 ^{282/01-}

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
«___» _____ 202_ р.

3. Вихідні дані до роботи *склад матеріалу, технологія формування, фізичні поля,
технічні умови, стандарти*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *вступ; огляд технічної літератури, методика досліджень та
характеристика вихідних матеріалів, дослідження механічних
властивостей епоксикомпозитів, технологічні режими формування
епоксикомпозитів, висновки*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1 слайд – формулювання мети; 2, 3 слайди – методика експериментальних

досліджень; 4, 5 слайди – дослідження структурування еполксіполімеру; 6, 7

слайди – залежність вмісту гель-фракції епоксикомпозитів від характеру

структурування; 8 слайд – результати досліджень внутрішніх напружень та

границі міцності пристисканні; 9, 10, 11 слайди – мікроструктури зразків

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормоконтроль</i>	<i>доцент кафедри матеріалознавства к.т.н. Мисковець С.В.</i>		

7. Дата видачі завдання « 02 » 09 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	<i>Вступ. Літературний огляд.</i>	<i>20.10.2025</i>	
2.	<i>Планування та виконання експерименту.</i>	<i>15.11.2025</i>	
3.	<i>Опис та аналіз результатів експерименту, розробка рекомендацій та висновків</i>	<i>06.12.2025</i>	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Котович Р.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Боярська І.В.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Котович Р.І. Вплив дії фізичних полів на інтенсивність структурування епоксикомпозитів. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Робота складається з текстової та графічної частин.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

Пояснювальна записка складається з 56 сторінок і містить такі розділи: технічне обґрунтування, методика досліджень та характеристика вихідних матеріалів, дослідження механічних властивостей епоксикомпозитів, технологічні режими формування епоксикомпозитів.

Також пояснювальна записка містить 3 таблиць, 14 рисунків, 22 літературних джерела та додаток.

Графічна частина складається з 13 аркушів формату А4, які розміщені в додатку А.

Ключові слова: епоксиолімер, епоксикомпозит, структурування, зовнішні поля.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МР 0425.00.000 ПЗ			
Розробив		Котович			Вплив дії фізичних полів на інтенсивність структурування епоксикомпозитів	Літ.	Арк.	Аркуші
Перевірів		Боярська					3	56
Н. контр.		Мисковець				ЛНТУ каф. матеріалознавства, гр. Мм - 21		
Затверд.		Імбідович						

ANNOTATION

Kotovich R.I. The influence of physical fields on the intensity of structuring of epoxycomposites. Manuscript.

Master's qualification work OP "Materials Science" specialty 132 materials science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

The work consists of textual and graphic parts.

The master's qualification work consists of an introduction, four sections, conclusions, list of used sources, appendices.

The explanatory note consists of 56 pages and contains the following sections: technical justification, research methodology and characterization of starting materials, research of mechanical properties of epoxy composites, technological modes of forming epoxy composites.

Also, the explanatory note contains 3 tables, 14 figures, 22 literary sources and an appendix.

The graphic part consists of 13 sheets of A4 format, which are placed in the appendix A.

Key words: epoxy polymer, epoxy composite, structuring, external fields.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	8
1.1. Структурні зміни в полімеркомпозитах сформованих в фізичних полях.....	8
1.2. Особливості та технологія обробки полімеркомпозитів фізичними полями.....	12
1.3. Висновки, вибір об'єктів та формування завдань досліджень.....	23
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	24
2.1. Характеристика вибраних матеріалів.....	24
2.2. Методи дослідження властивостей та структурування розроблених епоксиполімерних систем.....	26
2.3. Формування епоксикомпозитів	30
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ.....	32
3.1. Вплив режимів структурування на формування структури епоксикомпозитних матеріалів	32
3.2. Аналіз мікроструктури отриманих епоксикомпозитів.....	40
РОЗДІЛ 4 ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕЖИМИ ФОРМУВАННЯ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ.....	44
3.1. Вплив параметрів теплового потоку на процес формування епоксиполімерів	44
4.2. Розробка технологічного процесу.....	46
4.3. Технологічний процес формування захисних епоксиполімерних покриттів	48
4.4. Виникнення браку в епоксикомпозитах.....	51
ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55
ДОДАТКИ	

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Епоксидні олігомери становлять базу для отримання сучасних високотехнологічних полімерних композитів, тому особливості їх формування привертають значну увагу дослідників. Серед матричних матеріалів помітне місце займають епоксидні полімери (ЕП), адже під час їх тверднення утворюється тривимірна сітка, параметри якої можна цілеспрямовано регулювати шляхом введення дисперсних або полімерних наповнювачів.

Фізична модифікація полімерів і композитів на їх основі є дієвим способом впливу на будову та експлуатаційні характеристики матеріалів. Основними підходами до такої модифікації є дії зовнішніх силових полів (електричного, магнітного, температурного тощо) або комбінування основного полімеру з іншим полімером (чи олігомером), що має необхідні властивості.

До інноваційних методів обробки відноситься формування епоксидних композитів у фізичних полях, тобто застосування спрямованої енергії до структурних елементів епоксидного полімеру, що активізує процеси структурування полімерної матриці.

Останніми роками для структурування полімерних композицій використовують аеродинамічні печі, у яких нагрів забезпечується не нагрівними елементами, а теплом, що виникає від тертя повітряних потоків, створених роботою вентилятора відповідного обладнання.

Ще одним видом енергетичного впливу є інфрачервоне нагрівання, яке здійснюється шляхом опромінення матеріалу випромінюванням заданого спектра. Така обробка дозволяє підвищити міцність композитів до 20 %, що пов'язано зі збільшенням рівня їх структурованості.

Під час виконання кваліфікаційної роботи магістра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

1.1. Структурні зміни в полімеркомпозитах сформованих у фізичних полях

Існує ряд технологій, що дозволяють отримати деталі з полімерних матеріалів. Так, в промисловості використовують термокамерний метод з конвективним підведенням тепла [1]. Цей метод дає можливість отримати деталі з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) із властивостями, що задовольняють замовників, але він характеризується довготривалістю та енергоємністю.

Відомі також методи отвердіння ПКМ з використанням магнітних полів, радіаційного опромінювання, прискорених електронів [2]. В промисловості знаходять застосування методи високочастотного нагріву для обробки вологих матеріалів, для зварювання термоплавких матеріалів, при склеюванні неметалевих матеріалів [3].

Найбільш перспективним методом, який дає безумовні переваги у часі, екологічності та енергозбереженні, є отвердіння деталей з ПКМ в полі струмів високої частоти [4].

Для використання електромагнітного поля надвисокої частоти (ЕМП НВЧ) в складі технологічного процесу нагрівання напівфабрикатів з ПКМ та отвердіння їх необхідно вірно вибрати режим обробки, який обумовлюється наступними параметрами: частотою коливань поля; потужністю електромагнітного поля; відповідністю швидкого нагрівання і часу витримки хімічним процесам, що відбуваються при отвердінні.

Особливу актуальність має дослідження нагріву, що передбачає пряме поглинання енергії матеріалом, який нагрівається, за рахунок переміщення

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

іонів і обертання діполей з частотою коливань електромагнітного поля без зміни в структурі молекул [4].

Під час високочастотного нагрівання відбувається одночасне і рівномірне підвищення температури по всьому перерізу однорідного матеріалу. Крім того, нагрівання припиняється одночасно з вимиканням напруги на конденсаторі. На відміну від звичайного нагрівання, незалежно від стану навколишнього середовища легко регулюється температура матеріалу. Це має місце для частот від середньохвильового до метрового діапазону за рівномірного розподілу в матеріалі, що нагрівається, електричного поля. Розподіл частот, які застосовуються для нагрівання в електричному полі, наведені в таблиці 1.1 [2].

Таблиця 1.1 – Розподіл частот нагрівання в електричному полі

Діапазон електромагнітних хвиль	Довжина хвилі λ , м	Частота f , МГц
Середньохвильовий	1000 – 100	0,3 – 3
Короткохвильовий	100 – 10	3 – 30
Метровий	10 -1	30 – 300
Дециметровий	1 – 0,1	300 – 3000
Сантиметровий	0,1 – 0,01	3000 - 30000

У разі підвищення частоти до сантиметрового діапазону довжин хвиль глибина проникнення електромагнітної хвилі стає сумарною з товщиною матеріалу, що нагрівається.

Особливістю високочастотного методу нагрівання, що принципово відрізняє його від інших методів, є виділення теплової енергії в самій масі матеріалу, що нагрівається. Залежно від електричних властивостей матеріалу використовують два способи високочастотного нагрівання: індукційне

нагрівання провідних матеріалів у магнітному полі і нагрівання непровідних матеріалів в електричному полі.

Полімерні матеріали за малої вологості і досить низької температури зараховуються до діелектриків, а за підвищеної вологості чи вищої температури вони поведуться як напівпровідники.

Зараз визначились дві галузі промислового застосування НВЧ-нагрівання: з метою термообробки і з метою сушіння вологих матеріалів. Насамперед потрібно розвивати високочастотне нагрівання різних полімерних композиційних матеріалів, це новий метод нагрівання найбільшою мірою сприяє збільшенню продуктивності і поліпшує якість продукції. Після впровадження високочастотного підігрівання прес-порошків продуктивність пресів збільшується на 30...40 %. Це засвідчує перспективність і доцільність впровадження цього методу нагрівання з поступовим переходом до вищого діапазону використовуваних частот, що приведе до такого скорочення часу нагрівання, за якого операцію нагрівання можна буде включити в загальний цикл роботи прес-автомата.

За умови високочастотної термообробки до полімерів близько підходять продукти вулканізації гуми, шаруваті ізоляційні матеріали тощо.

У разі виготовлення виробів з термореактивних композиційних матеріалів використовують їхню властивість розм'якшуватися з підвищенням температури, а після досягнення певної температури синтезуватися, тобто переходити в незворотний стійкий стан [5].

У процесі тверднення композитів, залежно від термочасових режимів між макромолекулами мономерів діють ковалентні або вандерваальсові сили, які спричиняють зближення молекул і хімічну "усадку" зв'язника. Між молекулами виникають значні напруги. Ступінь завершеності процесу синтезу оцінюють за показниками міцності (модуль зсуву, поверхнева міцність і тощо) або електрофізичними характеристиками (тангенс кута діелектричних витрат) [6].

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обробка у змінному електромагнітному полі дозволяє отримати орієнтацію ланцюгів полімеру на поверхні наповнювача, що у свою чергу дозволяє прискорити початок полімеризації композиту за рахунок формування глобул [7].

Обробка композицій у змінному електромагнітному полі невеликої частоти (до 20 МГц) суттєво не впливає на адгезійну міцність захисних покриттів. Збільшення частоти ВЧЕМП із 20 до 60 МГц дозволяє підвищити адгезійну міцність на 5...10% і при цьому максимальне значення досягається при обробці з частотою 40 МГц. Подальше збільшення частоти призводить до зниження адгезійно-міцнісних характеристик, що пояснюється зшиванням молекул композиції внаслідок зростання температури у процесі обробки.

Відомо [8], що частки феро- і парамагнітних наповнювачів дисперсністю 2...10 мкм, унаслідок впливу зовнішнього намагнічуючого поля, формують енергетично вигідний однодомений стан і у такій структурі відсутні однодоменні шари.

Адгезійноміцнісні характеристики захисного покриття значно покращуються при попередній обробці в змінному електромагнітному полі при частоті $f=40$ МГц з наступним нанесенням на сталюну основу внаслідок орієнтованого розподілу частинок наповнювача в матриці. Орієнтація дисперсних частинок забезпечується взаємодією намагніченого наповнювача та феромагнітної сталюної основи і здійснюється безпосередньо в процесі нанесення покриття.

Самоорганізація структуроутворення під дією надвисоких частот дозволяє знизити залишкові напруження у захисних покриттях на 20...25 % за рахунок формування густої просторової сітки наповнювача, однорідної структури та інтенсивного перебігу релаксаційних процесів [9].

Комплексна обробка полімеркомпозитних покриттів зовнішніми фізичними полями, наповнених феромагнітним наповнювачем, зменшує інтенсивність зношування в середньому на 20 % .

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Застосування зовнішніх фізичних полів дає змогу змінювати надмолекулярну структуру, густину та термомеханічні властивості полімерних композиційних матеріалів. Епоксидний полімер, сформований під дією зовнішніх фізичних полів, набуває здатності до аномального температурного розширення (при цьому підвищується і температура протискування), а також має тенденцію до зростання густини. Для композитів на основі епоксидного полімеру (ЕП) і Al_2O_3 , сформованих у зовнішніх фізичних полях, характерна здатність до температурного розширення на відміну від сформованих у вихідному стані, в той час як композити на основі ЕП і Fe_2O_3 , сформовані в зовнішніх силових полях, характеризуються меншими значеннями коефіцієнта лінійного розширення на відміну від сформованих у вихідному стані. Це може пояснюватись тим, що Fe_2O_3 більш здатний до комплексоутворення на відміну від Al_2O_3 [10]. Композити, сформовані в зовнішніх фізичних полях, мають тенденцію до підвищення густини; вплив магнітного поля є більш істотний на композити на основі ЕП і феромагнітного наповнювача Fe_2O_3 .

1.2. Особливості та технології обробки полімеркомпозитів фізичними полями

До числа найважливіших типів печей і нагрівників належать печі опору, індукційні і дугові. Полімерні композиційні матеріали найчастіше виготовляють у печах опору.

Конструкція печей опору дає змогу регулювати робочу температуру в дуже вузьких межах. Найважливішим елементом печі є матеріал, з якого виготовляють нагрівні елементи, що визначають максимальну робочу температуру.

Оскільки температури тверднення полімерних зв'язників не перевищують 473 К, то як нагрівні елементи застосовують відкриті або

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

закриті спіралі зі сплавів хромель, ніхром, копель. Наприклад, максимальна робоча температура нагрівників з ніхрому становить 1333 К, хромелю – 1033 К. Звичайно, температура самих нагрівників значно перевищує температуру в печі, так що ці дані наведено для самих нагрівників. Форму, розміри й об'єми печей розраховують. Їх потужність залежить від температури печі і, зрозуміло, під її об'єму [2].

Для вирівнювання температури по об'єму в низькотемпературних печах застосовують спеціальні вентилятори.

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали добувають у високотемпературних печах опору, де як нагрівники використано графітові стрижні, що сполучені послідовно і знаходяться в контрольованій атмосфері.

Є багато інших матеріалів, які застосовують як нагрівники. Це молібден, вольфрам, карбіди, силіциди тощо. Однак у кожному конкретному випадку вибір має бути обґрунтованим і компромісним.

Останнім часом замість електричних печей опору застосовують так звані аеродинамічні печі, максимальна температура в яких становить 873...973 К, тобто це та температура, яку витримує матеріал лопаті вентилятора. Крім того, аеродинамічні печі в два-три рази менше споживають енергії, вони дуже прості і зручні. Нині розроблено понад 20 типів таких печей, їх можна використовувати на будь-якому підприємстві, у сільському господарстві і, для опалення приміщень тощо.

Дуже зручні ці печі при твердненні полімерних матеріалів виробів різних розмірів (до 10 м завдовжки і 3,5 м діаметром). Якщо вироби формують у механічних прес-формах під пресом, то можна застосовувати індукційний метод нагрівання або нагрівання за допомогою термоелектричних нагрівників.

Індукційна піч, або нагрівник, якщо це прес-форма, – це трансформатор, первинною обмоткою якого є індуктор, а вторинною – виріб, що нагрівається, або прес-форма. Зрозуміло, виріб, що нагрівається, має бути

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

провідним за заданої частоти. Для нагрівання металевих виробів і графіту зазвичай застосовують низькочастотні машинні генератори або перетворювачі частоти (теристори) для діелектриків – дуже високі, частоти, які у виробництві полімерів майже не застосовують, оскільки в процесі полімеризації чи полі конденсації смол змінюється електричний опір.

Частота струму тим менша, чим більші розміри прес-форми, що впливає з емпіричної формули

$$y_{\min} = \frac{25 \times 10^3 r_e}{d^2}$$

де r_e - питомий електричний опір, Ом·м;

d - діаметр прес-форми, мм.

Індуктори у вигляді соленоїда зазвичай виготовляють з мідних охолоджуваних водою труб діаметром 10...20 мм за місцем призначення, нагрівники омичного опору ТЕНи промисловість постачає у вигляді спіралей, вміщених у металеві труби і відокремлених від стінок фарфоровими ізоляторами.

ТЕНи можна застосовувати як у прес-формах, так і в печах. Іноді в прес-формах роблять спеціальні канали, куди вставляють теплонагрівники. За такого використання ТЕНів коефіцієнт корисної дії підвищується.

У разі індукційного нагрівання пластиків або інших непровідних матеріалів застосовують товстостінні металеві чи графітові нагрівники, температуру яких забезпечують вихрові струми і передають теплоту в простір, де знаходяться деталі, що нагріваються.

Інфрачервоні промені є одним з видів електромагнітного випромінювання. Як різновид електромагнітних коливань ІЧ-випромінювання займає в спектрі електромагнітних хвиль широку ділянку – від $76 \cdot 10^{-8}$ до 10^{-3} м.

Основною характеристикою генератора ІЧ-випромінювання є променистий потік, що визначає потужність випромінювання. Кількість

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

енергії, яку сприймає тіло, що нагрівається, відповідає енергетичній опромінюваності. Атмосферне середовище є практично прозорим для ІЧ-променів навіть за наявності в ньому диму, пари, туману. У разі поширення ІЧ-променів у щільних середовищах їхнє ослаблення визначається не дифракцією і розсіюванням, а поглинанням променистої енергії. Тому глибина проникнення ІЧ-променів у щільних середовищах є функцією поглинання: чим вища інтенсивність поглинання променів у речовині, тим менша глибина проникнення випромінювання. Певні обмеження щодо глибини проникнення ІЧ-променів у щільні середовища не заважають використанню їх для нагрівання різного роду виробів, у тому числі ПКМ.

Внаслідок поглинання променистої енергії верхні шари матеріалу розігріваються до певної температури. Подальше поширення теплоти у глибші шари відбувається шляхом теплопровідності. Тим самим уможливується нагрівання досить товстих шарів матеріалу.

Джерелом ІЧ-енергії може бути будь-яке нагріте тіло (газоподібне, рідке, тверде). Джерелом випромінювання в ІЧ-ділянці спектра за фізичною природою генерування енергії можна розділити на п'ять груп: джерела теплового випромінювання, електролюмінісцентні, змішаного випромінювання, електромагнітні й оптичні квантові генератори (лазери).

Джерела теплового випромінювання різноманітних типів і конструкцій класифікують за довжиною хвилі максимуму випромінювання, що заложить від температури випромінювача. Світлі (короткохвильові) випромінювачі мають температуру 1773...2073 К і вище, частина їхньої енергії припадає на видиму ділянку спектра, а максимум інтенсивності – на діапазон $(1...2) \cdot 10^{-6}$ м. Темні (довгохвильові) випромінювачі створюють випромінювання з максимальною інтенсивністю в ділянці $(3,5...5,0) \cdot 10^{-6}$ м. У разі ІЧ-нагрівання до різних випромінювачів можна висунути загальні вимоги і намітити їхні

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

технічні показники. Генератори ІЧ-випромінювання мають задовольняти таким основним вимогам:

- забезпечувати стабільний розподіл інтенсивності випромінювання і максимально можливу рівномірність опромінення оброблюваного матеріалу;
- мати мінімальну теплову інерцію, від якої залежить тривалість приведення випромінювача в робочий стан;
- мати високий енергетичний ККД і щонайбільше тривалість терміну експлуатації.

Переліченим загальним вимогам у разі застосування ІЧ-нагрівання для низькотемпературних процесів відповідають джерела випромінювання, що використовують електричне нагрівання. До електричних генераторів ІЧ-випромінювання належать дзеркальні лампи розжарювання, випромінювачі з кварцовими трубками та елементи опорів [11].

Найпоширенішою і найефективнішою конструкцією низькотемпературного ІЧ-випромінювача є герметичний трубчастий електронагрівник. Трубчасті електронагрівники задовольняють основним вимогам, що ставлять до випромінювачів. Вони не складні за будовою, живляться від промислової електромережі, міцні, довговічні, не мають скляних частин і легко можуть бути зібрані у вигляді панелей різних розмірів. За віддачею променистого потоку трубчасті електронагрівники поступаються ламповим випромінювачам, але перевершують багато які темні випромінювачі. В разі опромінення на горизонтальній поверхні за сприятливих умов світловіддача у вигляді ІЧ-променів може досягати 50 %.

Недоліком трубчастих електронагрівників є значна теплова інерція (тривалість доведення до робочої температури становить 240...300 с). Цей недолік позначається тільки під час пуску терморадіаційної установки. Темні ІЧ-випромінювачі мають відносно невисоку температуру поверхні нагрівання, що сприяє створенню "м'яких" режимів термоотверднення. Для забезпечення щонайбільшої її щільності потоку ІЧ-випромінювання

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

використовують керамічні панельні електронагрівники, випромінювальна поверхня яких має пористу будову. Такі нагрівники забезпечують можливість нагрівання до відносно високої температури і підбір потрібного спектра випромінювання за рахунок селективної випромінювальної здатності різних компонентів кераміки.

Внаслідок простоти, доступності, відносно невисокої вартості генераторів енергії ІЧ-нагрівання знайшло широке застосування в технологічних процесах як перспективний спосіб прискореного тверднення полімерних матеріалів. ІЧ-нагрівання використовують на різних стадіях виготовлення виробів. Під час намотування попередньо просоченим матеріалом нагрівання потрібне для розм'якшення зв'язника, а потім, після закінчення намотування, для його тверднення. У разі намотування "мокрим" методом потрібне нагрівання зв'язника в просочувальній ванні для зменшення його в'язкості, тим самим – поліпшення якості просочення і швидкості змочування. ІЧ-нагрівання застосовують і під час пошарово-послідовного формування конструкцій. Оскільки швидкість намотування зазвичай намагаються зробити достатньо високою, нагрівник, з одного боку, має забезпечувати максимально швидке нагрівання поверхневого шару, з іншого - максимум його випромінювання має припадати на ту частину спектра, яка краще поглинається матеріалом. Найбільшого ефекту нагрівання досягають у разі відповідності спектральних характеристик випромінювача й оптичних властивостей матеріалу. Експериментально встановлено, що феноло-формальдегідні й епоксидні зв'язники добре поглинають ІЧ-випромінювання в діапазон довжин хвиль $(2,7...4,0) \cdot 10^{-6}$ м і потім і понад $5,0 \cdot 10^{-6}$ м. Вибір джерела ІЧ-нагрівання в зазначеному діапазоні довжин хвиль створює оптимальні умови впливу випромінювання на структуру і властивості матеріалів у процесі тверднення.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Основною вимогою при визначенні енергетичних характеристик установок є забезпечення рівномірності опромінення поверхні матеріалу в процесі нагрівання до заданої температури.

ІЧ-установку розраховують на основі диференціального рівняння теплового балансу, згідно з яким енергія, що поглинається опромінюваним матеріалом за час dt , витрачається на нагрівання (dQ_H), віддачу теплоти конвекцією (dQ_K), випромінюванням (dQ_B) і на випарювання розчинників ($dQ_{\text{вип}}$):

$$dQ = dQ_H + dQ_K + dQ_B + dQ_{\text{вип}}$$

Для створення рівномірного поля опромінення, яке б забезпечувало оптимальну температуру на поверхні, велике значення має розміщення джерел ІЧ-нагрівання.

Встановлено, що зі збільшенням відстані між об'єктом дослідження і лампою значно зменшується опромінення, і як наслідок – знижується температура нагрівання.

У разі опромінення одиничною лампою об'єкт найбільше опромінюється в середині поля, в поперечному і поздовжньому напрямках опромінення спадає. Досягнення опромінення, близького до рівномірного, на значній площі забезпечуються сполученням декількох ламп у групу.

За спільної дії групи випромінювачів у результаті додавання кривих розподілу енергії створюється рівномірне поле опромінення, при цьому опромінюваність збільшується майже вдвічі порівняно з одиночним випромінювачем. Зміни значень величини опромінення досягають також регулюванням напруги живлення.

Енергетичне опромінення в міру віддалення від середини поля зменшується й у разі групи випромінювачів. Найекономічнішим шляхом подолання “крайового ефекту” є розміщення відбивачів у безпосередній близькості її зовнішніх випромінювачів системи. Це зумовлює перерозподіл в відбитого випромінювання на краї опромінюваного матеріалу.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Застосування відбивачів забезпечує також створення потрібного ступеня рівномірності поля опромінення і збільшення значень опромінення об'єкта. На практиці можна застосовувати плоско паралельні, сферичні, параболічні та інші відбивачі, що концентрують енергію.

Рентгенографічні дослідження підтверджують факт інтенсивнішого розвитку розвитку синтезу і збільшення ділянок упорядкування в разі отверднення полімерних зв'язників під впливом ІЧ-опромінення порівняно з конвективним нагріванням, що відбувається без якісної зміни кінцевих продуктів реакції. Це пов'язано з тим, що під впливом ІЧ-променів у процесі синтезу енергія активації сприймається молекулами безпосередньо, а не за рахунок теплопровідності отверджуваної системи. Ця теза добре підтверджується результатами дериватографічних досліджень. У композитах, оброблених ІЧ-нагріванням, порівняно з конвективним виявлено більшу міцність зв'язків між макромолекулами, що істотно впливає на міцнісні характеристики матеріалу.

Встановлено підвищення міцності за розривних навантажень до 20 % в разі високого ступеня тверднення. Це можна пояснити тим, що синтез зв'язників за допомогою ІЧ-випромінювання прискорює процес тверднення. Крім того, за пошарової полімеризації за допомогою ІЧ-випромінювання в процесі укладання препрега кожен наступний шар наносять начебто на «тверду» основу, що сприяє і кращому натягу волокна, і щільному укладанню. При цьому зв'язник розподіляється рівномірніше, що також сприяє підвищенню міцності композита за значної інтенсифікації (в 5...7 разів) процесу формування виробів. Під час реалізації процесу тверднення композитів на основі зв'язників поліконденсаційного типу за впливу в процесі формоутворення ІЧ-опромінення відбувається вільний і послідовний вихід летких речовин, що значно поліпшує якість матеріалу.

У разі ІЧ-випромінювання процеси прогрівання й тверднення суміщаються, внаслідок чого різко скорочується час формоутворення

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

виробів. За конвективного підведення теплоти процеси нагрівання й тверднення розвиваються послідовно один за одним. Оскільки теплопровідність композита низька, він нагрівається від поверхні до центра заготовки. Градієнт температур, що виникає по перерізу заготовки, поступово зменшується, подовжуючи як час наскрізного прогрівання, так і тривалість процесу тверднення.

ІЧ-нагрівання інтенсифікує процес тверднення внаслідок впливу квантів енергії на розвиток хімічних реакцій між макромолекулами, тобто виникають фотохімічні процеси взаємодії.

Мікрохвильовим випромінюванням (МХВ) називають діапазон частот від 300 ГГц до 300 МГц в електромагнітному спектрі розташований між інфрачервоними та радіочастотами. У більшості нагрівальних мікрохвильових установок використовується частота 2450 МГц, на якій працюють побутові мікрохвильові печі. Термін “мікрохвилі” був запозичений з зарубіжної літератури і став використовуватися в останні роки набагато частіше, ніж раніше вживається термін “надвисока частота” або “СВЧ”, що відноситься до того ж діапазону частот [12].

Для традиційних (термічних) способів нагріву характерна передача тепла в об'єм речовини з його поверхні за допомогою теплопровідності і конвекції. Якщо теплопровідність об'єкта низька, що має місце у діелектриків, то нагрів відбувається дуже повільно, з локальним перегрівом поверхні. У разі впливу мікрохвиль на діелектрик нагрів відбувається “зсередини” одночасно по всьому об'єму зразка за рахунок створення ефекту діелектричних втрат.

Принципова схема мікрохвильової установки включає генератор електромагнітного випромінювання (найчастіше магнетрон), хвилевід, камеру для підігріву чи резонатор, систему вентиляції та охолодження магнетрона і камери, систему захисту від надмірного випромінювання, систему вимірювальних приладів і блок управління.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В даний час МХВ широко застосовується в наукових дослідженнях і промисловості. Крім систем радіолокації і радіонавігації, це системи супутникового телебачення, телефонна стільниковий зв'язок, апаратура для наукових досліджень в хімії, фізиці, біології, медицина, харчове виробництво і побутова сфера. Мікрохвильовий нагрів використовують для вирішення завдань нафтовидобутку, нафтохімії і нафтопереробки, в будівництві, для обробки ґрунтів в місцях прокладки трубопроводів.

Найбільш досконалі лабораторні мікрохвильові установки розроблені австралійськими вченими спільно з SEM Corp. (США) [15]. Це CMR – мікрохвильовий реактор безперервної дії (рис. 1.1) і MBR – мікрохвильовий реактор періодичної дії (рис. 1.2).

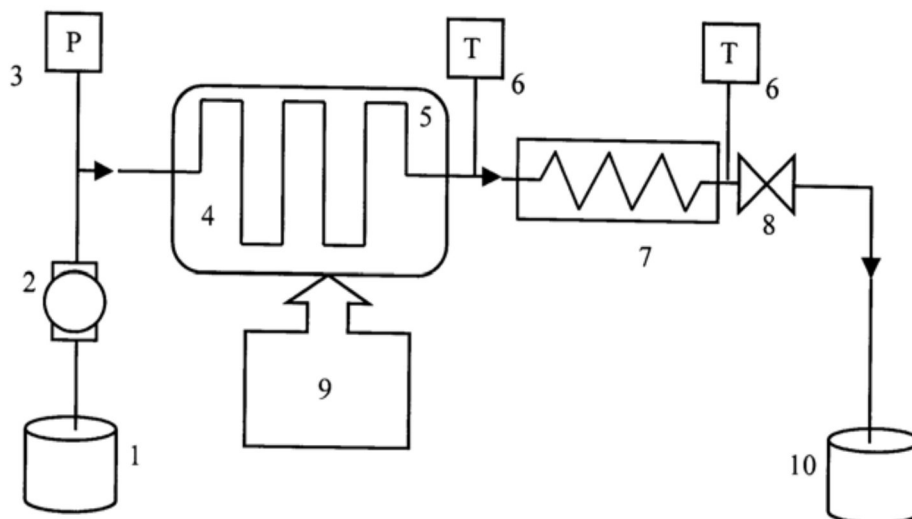


Рисунок 1.1 – Схема лабораторної установки безперервної дії:

1 – реакційна суміш, 2 – дозувальний насос, 3 – датчик тиску, 4 – мікрохвильова камера, 5 – змійовик, 6 – датчик температури, 7 – теплообмінник, 8 – регулятор тиску, 9 - мікропроцесорний контролер, 10 – збирач продуктів

Перевагами мікрохвильової обробки діелектричних середовищ (пов'язаної, насамперед, з втратами електромагнітної енергії на подолання взаємного тяжіння їх поляризованих молекул) перед іншими способами

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

обробки (наприклад, нагріванням) є пряме об'ємне, екологічно чистий вплив, висока інтенсивність, гнучка керованість процесу, незалежність від дефіцитних джерел енергії [13].

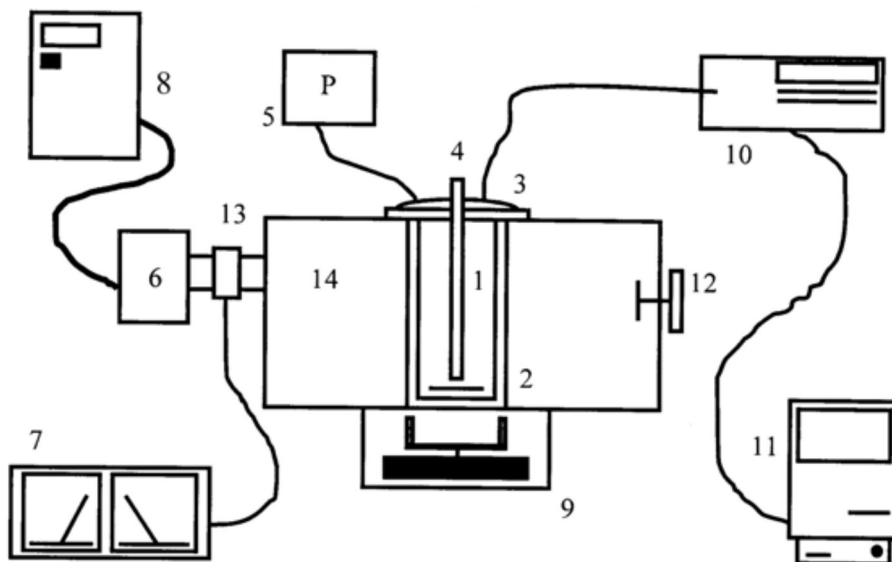


Рисунок 1.2 – Схема лабораторної установки періодичної дії:

1 – реакційний посуд, 2 – кожух, 3 – фланець, 4 – охолоджуюча трубка, 5 – датчик тиску, 6 – магнетрон, 7 – ватметри вхідний и відображеної потужності, 8 – джерело змінного струму, 9 – мішалка, 10 – оптоволоконний термометр, 11 – комп'ютер, 12 – пристрій навантаження, 13 – хвилевід, 14 – мікрохвильова камера

Термостійкою основою для таких покриттів є полімери органічної або неорганічної природи (наприклад, епоксикремнійорганічні смоли і каолінит) [14]. В якості наповнювача композитних матеріалів доцільно застосовувати ферити на основі електропровідних оксидів перехідних металів зі структурою шпінелі зверненого типу [15]. Саме ці наповнювачі дозволяють забезпечити не тільки необхідний рівень електропровідності композитного перетворювача енергії, а й необхідну його сумарну намагніченість внаслідок

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

неповної компенсації антиферромагнітного упорядкування спінових систем їх елементарного молекулярного осередку.

1.3. Висновки, вибір об'єктів та формування завдань досліджень

Одним із перспективних напрямків створення захисних полімеркомпозитних покриттів з оптимальними фізико-механічними властивостями є їх попередня обробка зовнішніми фізичними полями.

Оптимізація температурно-часових режимів тверднення є важливим технологічним етапом розробки епоксикомпозитних матеріалів, оскільки недостатній час полімеризації не може забезпечити утворення достатньої кількості хімічних зв'язків між макромолекулами матриці та частинками наповнювача, а при надто високій температурі має місце зниження фізико-механічних характеристик матеріалу внаслідок початку руйнування зв'язків у композиті через термодеструктивні процеси та ріст залишкових напружень.

На основі даних використаних джерел сформульовано основні задачі, які необхідно вирішити при дослідженні здатності епоксикомпозитних систем до структуванні під дією фізичних полів:

- підібрати раціональне співвідношення компонентів з метою забезпечення технологічності формування системи;
- дослідити вплив наповнювачів на фізико-механічні властивості епоксикомпозитів;
- дослідити вплив температури формування епоксиолімерів;
- дослідити процеси структуроутворення епоксидної матриці;
- провести аналіз мікроструктур наповнених епоксисистем.

РОЗДІЛ 2

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1. Характеристика вибраних матеріалів

Як вихідний матеріал використано епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 (ДСТУ 2093-92), що представляє собою високов'язку прозору рідину. ЕД-20 твердне при нормальній або підвищених температурах без зовнішнього тиску, що дозволяє працювати без пресового і термічного обладнання. Можливість тверднення цієї смоли без виділення побічних продуктів забезпечує незначну пористість і високу щільність матеріалів [16-17]. Основні фізико-хімічні властивості незатвердженої смоли представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Фізико-хімічні властивості смоли марки ЕД-20

Показник	Значення показника
Густина, г/см ³	1,16-1,2
Молекулярна маса	390-430
Вміст епоксидних груп, %	19,9-22,0
Вміст летких речовин, %	1,0
Умовна в'язкість за кульковим віскозиметром при температурі 25 °С, с	65
Вміст загального хлору, %	1,0

Для тверднення епоксидних композицій використовували поліетиленполіамін (ПЕПА) згідно з ТУ 6-02-594-70. Цей затверджувач призначений для структурування епоксидних смол за кімнатної або зниженої температури, у тому числі за умов підвищеної вологості. За зовнішнім виглядом ПЕПА являє собою рідину світло-жовтого – темно-бурого кольору

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

без механічних домішок. Масова частка загального азоту у ньому становить не менше ніж 30 %.

Як наповнювачі застосовано комплекс інгредієнтів. Зокрема, використано порошок чавуну – сплаву заліза з вуглецем, у якому вміст вуглецю може коливатися від 2,14 до 4,3 % і більше. Розрізняють такі основні різновиди чавуну: сірий, білий та ковкий [18].

Також використано фторопласт – синтетичний атомовмісний поліолефін, що характеризується низьким коефіцієнтом тертя та високою хімічною стійкістю до кислот, лугів і сильних окисників [19]. Матеріал практично не поглинає вологи й може експлуатуватися у широкому температурному діапазоні: від -269 до 260 °С, а короткочасно – до 400 °С. Твердість за Брінелем становить $29,4 \dots 39,2$ МПа, густина – $2,19 \dots 2,21$ г/см³. У дослідженні застосовано ультрадисперсний фторопласт.

Оксид алюмінію (Al_2O_3) – це безбарвна кристалічна сполука, відома як глинозем. Він являє собою білі кристали, що не розчиняються у воді та відзначаються високою хімічною інертністю; температура його плавлення становить 2050 °С. У водному середовищі оксид алюмінію не розчиняється і не вступає в реакції [19].

Композиційні матеріали, створені на основі корунду, характеризуються підвищеними електроізоляційними властивостями, високою теплопровідністю, значною хімічною стійкістю, твердістю та зносостійкістю, а також низьким коефіцієнтом термічного розширення [18].

Дисперсні наповнювачі загалом відзначаються високою міцністю, твердістю та великим модулем пружності. Для покращення фізико-механічних властивостей полімерних композитів у дослідженні застосовували наповнювачі з розміром частинок у межах $5 \dots 10$ до $60 \dots 65$ мкм. Порошок оксиду алюмінію використовували для підвищення корозійної та зносостійкої здатності матеріалу.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Металеві дисперсні наповнювачі надають полімерним матеріалам специфічних експлуатаційних характеристик, зокрема підвищеної тепло- та електропровідності, а також теплоємності. Полімерні композити, модифіковані металевими порошками, застосовують для ремонту техніки як клеї, а також як корозійностійкі захисні покриття. Порошкові метали широко використовуються у виробництві деталей і вузлів автомобільної та сільськогосподарської техніки, побутових приладів, канцелярського обладнання й інструментів.

2.2. Методи дослідження властивостей та структурування розроблених епоксикомпозитних систем

Вибір методів і методик дослідження властивостей епоксикомпозитних матеріалів здійснювали з урахуванням можливих умов їх подальшої експлуатації. Для оцінювання конструкційної міцності та встановлення впливу температурних факторів застосовували фізико-механічні методи та способи визначення ступеня структурованості матеріалу.

Границю міцності при стиску визначали відповідно до вимог ГОСТ 4651-82. Для дослідження використовували циліндричні зразки діаметром $10 \pm 0,5$ мм і висотою 15 мм, які піддавали стискуванню зі ступінчастим підвищенням навантаження при швидкості зближення робочих площадок 2 мм/хв.

Межу міцності при стиску розраховували за формулою:

$$\sigma_{ст} = \frac{R}{S},$$

де P – навантаження, при якому зразок зруйнувався, Н;

S – площа поперечного перерізу зразка, см^2 .

Внутрішні напруження визначали консольним методом [20] відповідно до ГОСТ 13036-67. Сутність цього методу полягає у фіксації зміщення

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вільного кінця пружно закріпленої консольно пластини відносно її початкового положення. Виникнення деформації пластини зумовлене дією внутрішніх напружень, що формуються в покриттях (рис. 2.1).

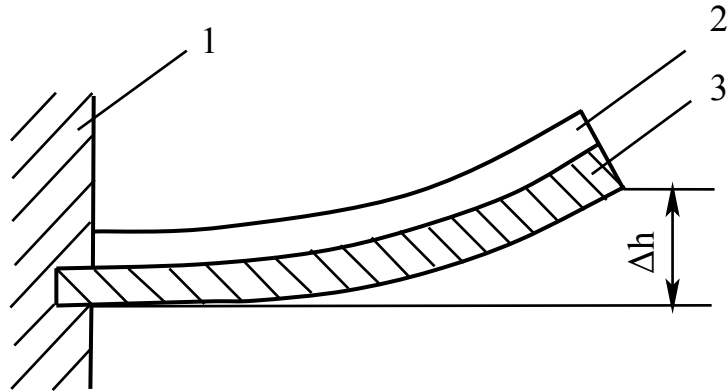


Рисунок 2.1 – Схема виникнення внутрішніх напружень: 1 – основа консолі; 2 – епоксикомпозитне покриття; 3 – пластинка-основа; Δh – величина відхилення консолі

Внутрішні напруження розраховували за формулою:

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{DhEt^3}{3l^2(t+D)Dt}$$

де Δh – відхилення вільного кінця консолі, мм;

E – модуль пружності підложки, МПа;

t – товщина підложки, мм;

l – довжина плівки, мм;

Δt – товщина плівки, мм.

Покриття наносили на пластинку-основу з пружної сталі з відомими фізико-механічними характеристиками розміром 80'15 мм, товщиною 0,25...0,3 мм. Товщину твердого покриття Δt визначити як середнє арифметичне з трьох замірів вздовж довжини консолі.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ступінь тверднення матеріалів і покриттів визначали за вмістом гель-золь-фракції. Метод оснований на здатності частини матеріалу (плівки), не зв'язаної в полімерну сітку, вимиватися органічним розчинником в екстракторі Сокслета (рис. 2.2), який працював в автоматичному режимі.



Рисунок 2.2 – Екстрактора Сокслета в робочому режимі

Екстракцію зразків у формі пластин розміром 40'70 мм товщиною до 0,5 мм проводили в толуолі протягом 8 год з наступним сушінням при

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температурі 393 К до постійної маси. Масу зразків до і після екстракції визначали на аналітичних лабораторних вагах з точністю до 0,0001 г.

Вміст гель-фракції в плівці наповненої дисперсними частинками визначали за формулою:

$$G = \frac{100 - (M_1 - M_2) \times 100\%}{M_0},$$

де M_1, M_2 – маса патрона з наважкою плівки відповідно до і після екстракції;

M_0 – вміст плівкоутворюючої речовини в наважці плівки.

Макро- та мікроструктуру матеріалу досліджували за допомогою оптичного мікроскопа МБС-9 із кратністю збільшення $\times 30$ та металографічного мікроскопа МІМ-10 ($\times 100 \dots 600$). Для аналізу тонкої будови полімеркомпозитних матеріалів застосовували методи електронної мікроскопії [21].

Структурні дослідження виконували на сканувальному електронному мікроскопі SUPERPROBE 733 (JEOL, Японія) при прискорювальній напрузі 25 кВ. Перед отриманням реплік мікрошліфи спочатку аналізували за допомогою оптичного мікроскопа, під час чого на поверхні позначали характерні ділянки. Репліки виготовляли саме з цих зон, після чого їх покривали тонким шаром золота.

Для дослідження структури епоксидного композитного матеріалу використовували методи пластмасографії [21], які забезпечують найбільш достовірне відтворення розташування структурних компонентів, особливостей їх взаємодії, зокрема на межі поділу фаз, а також дають змогу виявляти мікро- та макродефекти. Проте нині застосування цих методик є обмеженим, оскільки виготовлення шліфів полімеркомпозитних матеріалів ускладнюється їх вираженою анізотропністю та значною різницею фізико-механічних властивостей між полімерною матрицею і наповнювачами. Під час шліфування та полірування епоксидного композиту в мікрооб'ємах

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матриці утворюються механічно пошкоджені поверхневі шари, і без їх повного усунення внутрішня мікроструктура матеріалу не може бути коректно досліджена. Площу структурних складових визначали за допомогою програмного забезпечення Photom 1.31.

2.3. Формування епоксикомпозитів

Формування дослідних зразків здійснювали шляхом приготування однорідної композиції, до якої входили заздалегідь визначені компоненти. Залежно від необхідного об'єму зразків розраховували кількість інгредієнтів у масових частинах, виходячи зі 100 мас. ч. епоксидної смоли ЕД-20. До смоли ЕД-20 та затверджувача вводили наповнювачі, які попередньо висушували у сушильній шафі для повного видалення вологи. Одержану композицію наносили на підготовлену основу або заливали у спеціальні форми.

Перед нанесенням поверхню обробляли абразивом для отримання необхідної шорсткості та знежирювали ацетоном. Тверднення епоксикомпозитів за нормальних умов тривало 24 год. Додаткову термічну обробку проводили в печі при 120 °С протягом 4 год, при цьому допустиме відхилення температури не перевищувало ± 2 К. Окремо здійснювали варіант термообробки без попереднього тверднення: зразки одразу піддавали ступінчастому нагріванню в печі при температурах 20 °С, 30 °С, 50 °С, 70 °С і 120 °С з експозицією по 10 хв на кожному етапі.

Термічну обробку здійснювали за допомогою інфрачервоного випромінювання, змінюючи висоту розташування зразків відносно джерела ІЧ-нагріву (100 мм, 70 мм, 40 мм). Тривалість впливу становила 10 хв.

Також проводили дослідження з визначення оптимального часу та потужності, за яких забезпечується ефективне структурування

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

епоксиолімерів у полі струмів високої частоти (СВЧ) (рис. 2.3). Тривалість витримки змінювали в діапазоні 5...50 с, після чого проводили охолодження протягом 1...2 хв. Потужність електромагнітного випромінювання варіювали від 25 до 170 Вт.

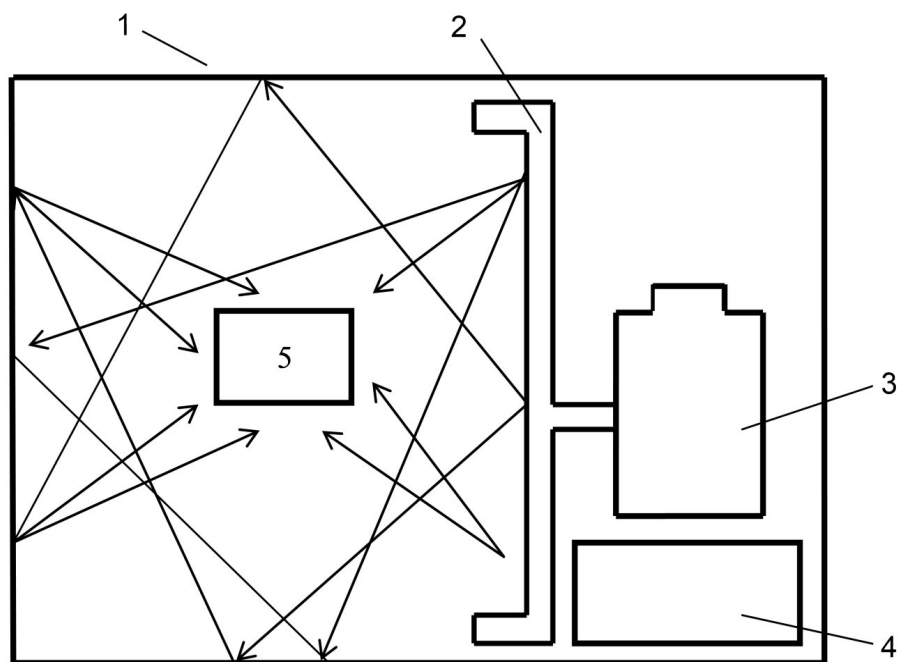


Рисунок 2.3 – Схема камери високочастотної обробки:
1 – корпус; 2 – хвилевипромінювач; 3 – магнетрон;
4 – трансформатор; 5 – зразок

РОЗДІЛ 3
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

3.1. Вплив режимів структурування на формування структури епоксикомпозитних матеріалів

Для визначення ступеня структурування епоксиолімеру було проведено дослідження вмісту гель- та золь-фракцій (рис. 3.1). Ступінь структурованості епоксиолімерів істотно залежить від режиму термічної обробки. Для проведення випробувань застосовано кілька варіантів формування зразків епоксиолімеру:

тверднення при нормальних умовах протягом 24 год і наступній термічній обробці у печі за температури 120 °С протягом 4 год;

зразки піддавались ступінчастій термообробці у печі за температури 20 °С, 30 °С, 50 °С, 70 °С і 120 °С по 10 хв, без попереднього тверднення;

обробка у полі струмів високої частоти;

ІЧ-променями;

термообробка ступінчаста, СВЧ і ІЧ-випромінювання з попереднім твердненням протягом 1 год;

термообробка ступінчаста, СВЧ і ІЧ-випромінювання з попереднім твердненням протягом 2 год.

Експериментально встановлено, що найвищий ступінь структурування епоксиолімерів спостерігається при термообробці у полі струмів високої частоти після попереднього тверднення за нормальних умов протягом 1 год. Це пояснюється утворенням максимальної кількості хімічних зв'язків та додатковим енергетичним впливом, який підвищує рухливість сегментів макромолекул. Найнижчі значення ступеня структурування зафіксовано при ступінчастому нагріванні, що свідчить про недостатню інтенсивність теплового впливу.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 3.1 – Залежність вмісту гель-фракцій епоксиполімерів від характеру структурування

Загальні зображення зразків (рис. 3.2) підтверджують особливості структурування епоксиполімерів. Кількість тріщин у зразках, оброблених в аеродинамічній печі, СВЧ-печі та під дією ІЧ-променів (рис. 3.2 а, б, в, г), свідчить про здатність матеріалу протистояти руйнуванню під впливом розчинника, що підтверджує його кращу структурованість.

Введення дисперсних наповнювачів до складу епоксиполімерної матриці сприяє формуванню композиту з новими фізико-механічними властивостями. Для отримання матеріалу з високими механічними характеристиками вибір наповнювачів здійснювали з урахуванням їх фізико-механічних та теплофізичних параметрів. Оскільки матеріал призначений для роботи в умовах сухого тертя, як антифрикційний наповнювач застосовували

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ультрадисперсний фторопласт. Частинки фторопласту мають овальну форму і рівномірно сприймають навантаження незалежно від свого розташування в матриці.

Ступінь структурування епоксикомпозитів, наповнених порошками фторопласту, оксиду алюмінію та чавуну, істотно залежить від обраного режиму термічної обробки.



а



б



в



г

Рисунок 3.2 – Загальний вигляд епоксикомпозитів після екстрагування, які були структуровані під впливом:

а – ІЧ-випромінювання; б – термічного нагрівання ($t_{кін}=393$ К); в – СВЧ обробки; г – ступінчастого нагрівання

Як видно з рисунку 3.3 найвищу ступінь структурування (98,8 %) мають композити наповнені оксидом алюмінію після СВЧ обробки. Це

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

свідчить про зростання ступеня зшивання матриці у зовнішніх поверхневих шарах навколо наповнювача, що підвищує експлуатаційні характеристики даних епоксиполімерних систем. Ступінь зшивання визначається кількістю фізичних та хімічних зв'язків між макромолекулами полімеру і поверхнею дисперсних часток.

Рисунок 3.3 – Залежність вмісту гель-фракцій епоксикомпозитів від характеру структурування

Найнижчий ступінь структурування спостерігається у фторопласту (71,2 %) після термічної обробки в печі при 120 °С, яка проводилась після попереднього тверднення за нормальних умов протягом 24 год. Зниження ступеня структурованості пояснюється погіршенням змочуваності частинок наповнювачів епоксиполімером, що призводить до послаблення взаємодії компонентів системи між собою.

Загальні зображення зразків підтверджують особливості структурування епоксикомпозитів, наповнених порошком оксиду алюмінію.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

Кількість тріщин у зразках, оброблених в аеродинамічній печі, СВЧ-печі та під дією ІЧ-променів (рис. 3.4), свідчить про здатність матеріалу протистояти руйнуванню під впливом розчинника, що підтверджує його підвищену структурованість.



а



б



в



г

Рисунок 3.4 – Загальний вигляд після екстрагування епоксикомпозитів наповнених порошком оксиду алюмінію структурованих під дією:

а – ІЧ-випромінювання; б – термічного нагрівання ($t_{кін} = 393\text{ K}$); в – СВЧ обробки; г – ступінчастого нагрівання

Для підвищення механічних і експлуатаційних характеристик епоксидних полімерів у їх склад вводять дисперсні наповнювачі з різними

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

функціональними властивостями. Хімічний склад цих наповнювачів визначає здатність системи до утворення хімічних та фізичних зв'язків між активними центрами на поверхні частинок та кінцевими групами полімерної матриці.

Зовнішні силові поля впливають на поведінку наповнювачів у епоксикомпозитних системах і по-різному модулюють процеси структурування, оскільки природа та властивості наповнювачів є ключовими параметрами, що реагують на зовнішній вплив.

Епоксикомпозити, наповнені порошком фторопласту, характеризуються найнижчим рівнем внутрішніх напружень порівняно з іншими наповнювачами (рис. 3.5). Це пояснюється високою дисперсністю фторопласту, що забезпечує рівномірний розподіл частинок і однорідність системи. Крім того, цей наповнювач відзначається високою пластичністю та хімічною інертністю при формуванні зв'язків із епоксиполімером, що підвищує здатність системи до релаксації внутрішніх напружень.

Натомість тверді частинки оксиду алюмінію та заліза обмежують рухливість макромолекул полімерної матриці, сповільнюють релаксаційні процеси та підвищують напружений стан системи. Локалізація теплоти в зоні частинок заліза сприяє додатковому зростанню внутрішніх напружень

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЕПОКСИКОМПОЗИТИВ.

Рисунок 3.5 – Залежність внутрішніх напружень полі наповнених епоксикомпозитів від характеру структурування

Найвищі внутрішні напруження ($\sigma_{вн}=0,56$ МПа) зафіксовано для епоксикомпозиту структурованого під час термічного нагрівання за кінцевої температури 393 К, а найнижчі – за ІЧ-випромінювання ($\sigma_{вн}=0,17$ МПа), яке забезпечує більш рівномірне формування просторової сітки наповненого епоксикомпозиту з одночасним утворенням зв'язків в об'ємі матеріалу.

Структурування під час термічного нагрівання дозволяє отримати структуру епоксикомпозитів з яскраво вираженим розподілом внутрішніх напружень залежно від виду наповнювачів. Найнижчі значення внутрішніх напружень отримано під час формування структури за нерівномірного процесу полімеризації епоксиполімерної складової.

Експериментально встановлено, що порошок фторопласту знижує межу міцності при стисканні епоксикомпозитів (рис. 3.6), оскільки даний наповнювач має низьке значення вказаної характеристики.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найвищі значення межі міцності при стисканні ($\sigma_{ст}=137,5$ МПа) зафіксовано для епоксикомпозитів наповнених порошком оксиду алюмінію під час ступінчастого термічного нагрівання у печі.

Рисунок 3.6 – Залежність границі міцності при стисканні епоксикомпозитів від характеру структурування

Низькі значення межі міцності при стисканні епоксикомпозитів, структурованих за допомогою ГЧ-випромінювання, пояснюються недостатньо інтенсивним тепловим впливом зовнішнього поля на процеси полімеризації в системі, наповненій порошком фторопласту та оксиду алюмінію.

Епоксикомпозити, наповнені порошком заліза, демонструють вищу межу міцності при стисканні під час структурування в полі СВЧ та за ступінчастої термічної обробки. Це свідчить про чутливість даного наповнювача до дії електромагнітного поля у випадку СВЧ-обробки, або ж про рівномірне формування просторової сітки під час ступінчастого нагрівання.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Аналіз мікроструктури отриманих епоксикомпозитів

Мікроструктуру епоксикомпозитних зразків наведено на рисунках 3.7, 3.8 та 3.9. З аналізу зображень видно, що розподіл наповнювачів у епоксиполімерній матриці є нерівномірним, що призводить до утворення скупчень частинок, які виступають концентраторами напружень і сприяють руйнуванню матеріалу. Крім того, наявність пор у зразках знижує теоретичні значення міцності та твердості даних епоксикомпозитів.

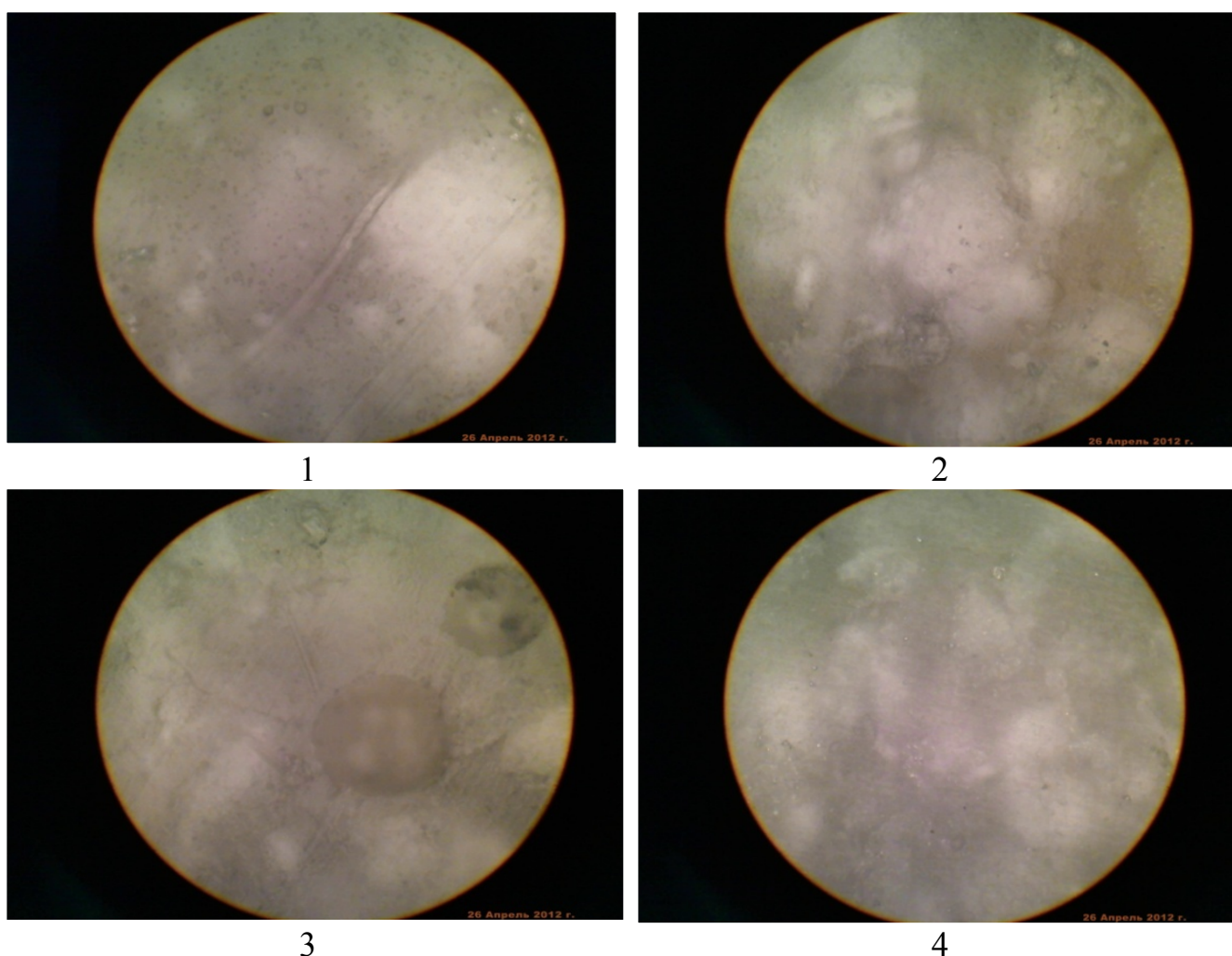
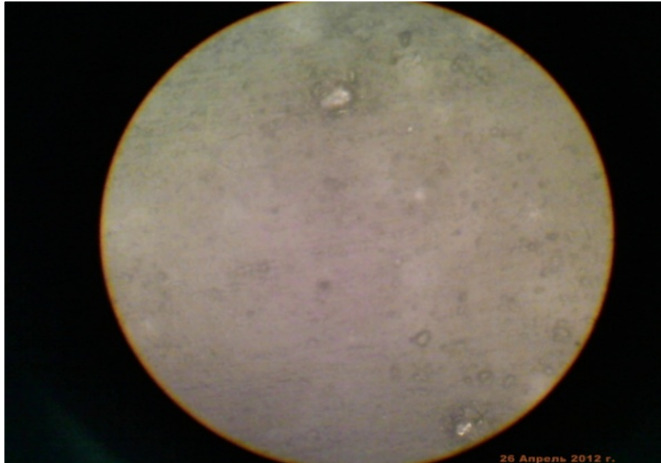


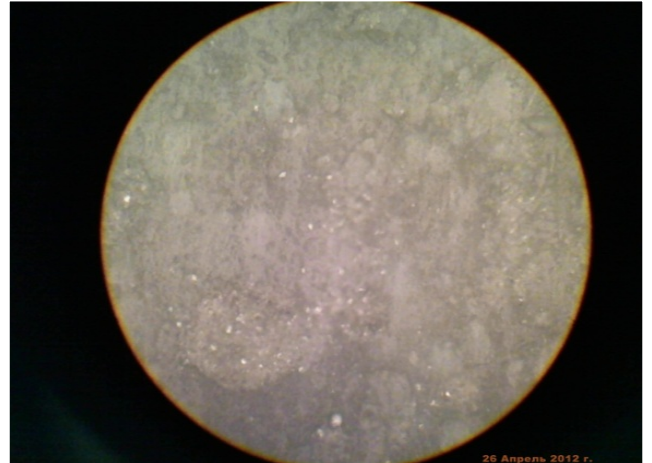
Рисунок 3.7 – Мікроструктура зразків епоксикомпозитів наповнених порошком фторопласту після термічної обробки:

1 – термообробка за 120 °С після отвердіння на повітрі протягом 24 год;
2 – СВЧ обробка; 3 – ІЧ-випромінювання; 4 – ступінчаста обробка

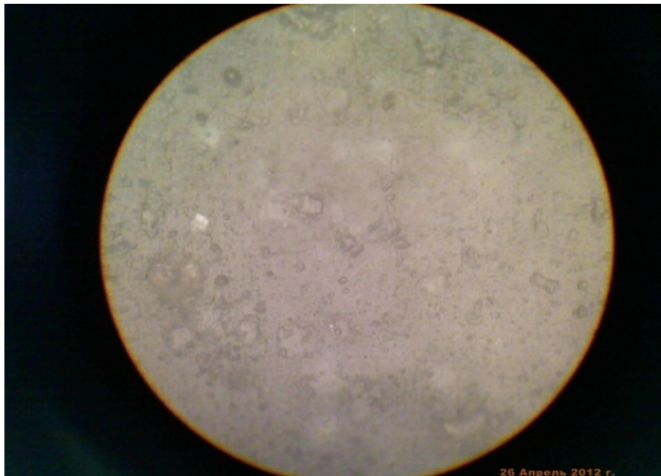
					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



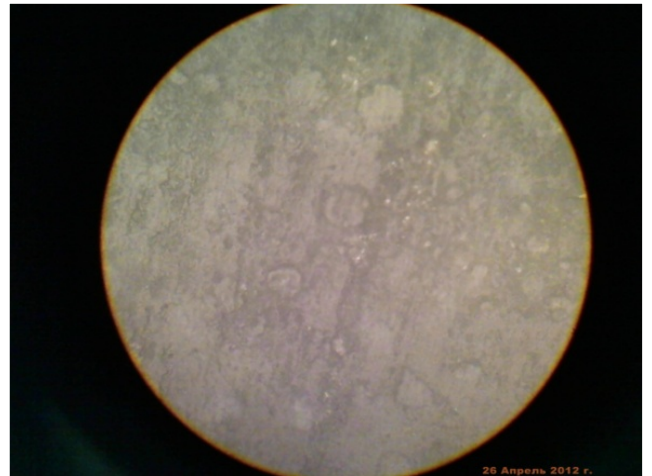
1



2



3

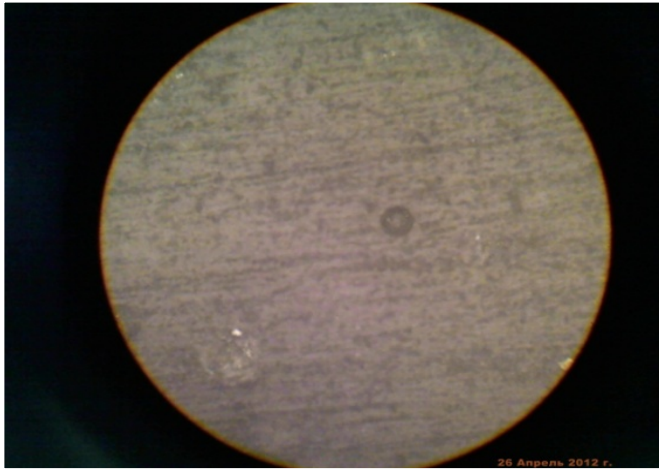


4

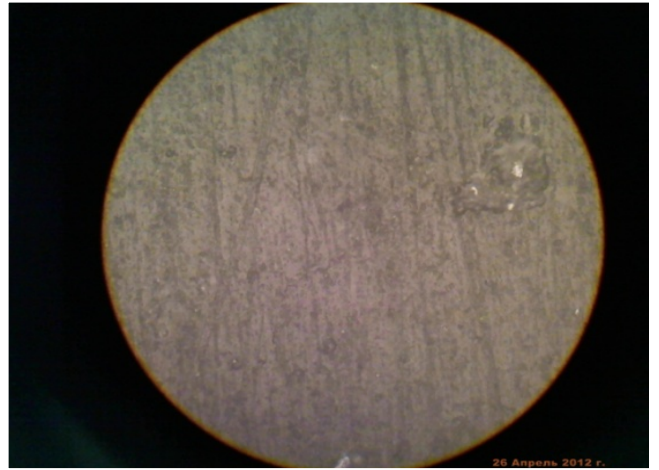
Рисунок 3.8 - Мікроструктура зразків епоксикомпозитів наповнених порошком оксиду алюмінію після термічної обробки:

1 – термообробка за 120 °С після твердіння на повітрі протягом 24 год; 2 – СВЧ обробка; 3 – УЧ-випромінювання; 4 – ступінчаста обробка

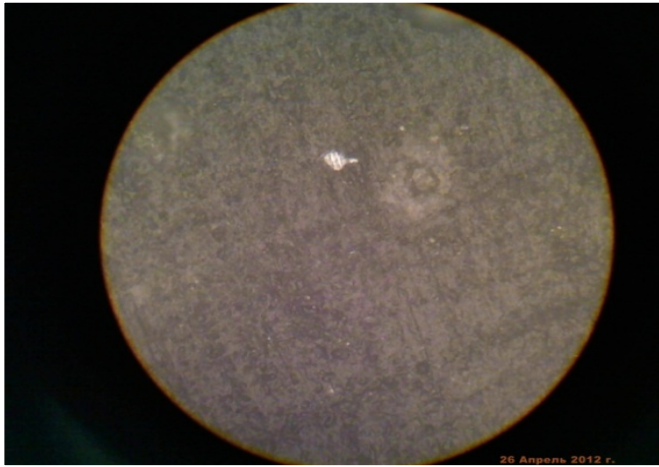
					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



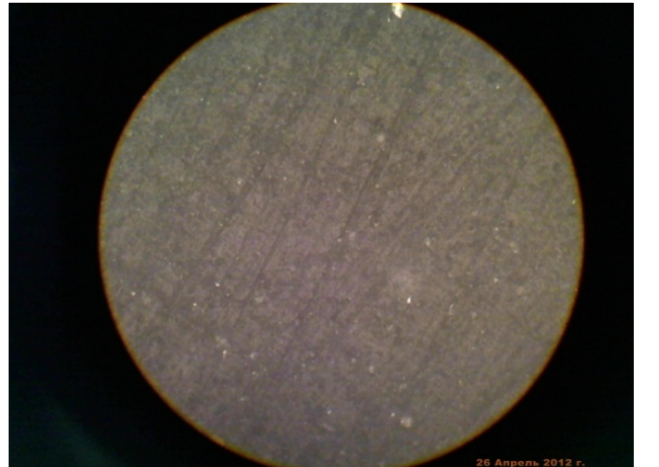
1



2



3



4

Рисунок 3.9 – Мікроструктура зразків епоксикомпозитів наповнених порошком заліза після термічної обробки:

1 – термообробка за 120 °С після отвердіння на повітрі протягом 24 год;
2 – СВЧ обробка; 3 – ІЧ-випромінювання; 4 – ступінчаста обробка

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4
ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕЖИМИ ФОРМУВАННЯ
ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

4.1. Вплив параметрів теплового потоку на процес формування епоксиполімерів

Оптимальний режим тверднення епоксидних смол забезпечує отримання матеріалу з необхідними функціональними властивостями та експлуатаційними характеристиками. Інтенсивний тепловий вплив під час формування виробів підвищує ступінь зшивання полімерної системи та ініціює релаксаційні процеси, що супроводжується покращенням фізико-механічних властивостей матеріалу.

На стадії переробки полімерні покриття на основі епоксидних смол володіють достатньою рідкотекучістю, що дозволяє рівномірно і швидко заповнювати форми, зазори, щілини, пори та капіляри. При подальшому нагріві матеріалу в'язкість зменшується, але скорочується й час перебування реактопласту у в'язкотекучому стані. При високих температурах полімер починає швидко твердіти, оскільки зростання числа просторових хімічних зв'язків підвищує його в'язкість.

На початковій стадії тверднення реакція протікає не за рахунок спільного росту молекулярної маси зв'язуючого, а за напрямком звуження молекулярно-масового розподілу — завдяки збільшенню молекулярної маси низькомолекулярних, більш рухомих фракцій. У цей період в'язкість реактопласта значною мірою визначається взаємозчепленням частинок наповнювача, що формують каркасну структуру, а не в'язкістю зв'язуючого. Після формування зшитої структури матеріал втрачає здатність до в'язкого течіння.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Температура є ключовим параметром, що впливає на швидкість хімічних реакцій затвердіння, в'язкість, час перебування зв'язуючого у в'язкотекучому стані та швидкість тверднення. Розплави полімерів не підкоряються закону Ньютона — їхня в'язкість зменшується зі зростанням напруги або швидкості зсуву, що є аномалією в'язкості.

Крім того, полімерні розплави проявляють високоеластичні властивості, тобто після зняття напружень частково відновлюють форму за рахунок накопичення поряд із пластичною деформацією високоеластичної деформації. Високоеластичні властивості проявляються, наприклад, у розбуханні струменя полімеру при виході з сопла. В'язкість розплаву залежить від температури, тиску та швидкості зсуву, причому характер цієї залежності різний для різних полімерів.

Температура розплаву у формі є неоднорідною: у центрі форми вона вища за температуру текучості матеріалу, тоді як поблизу “холодних” стінок — нижча за температуру склування. Через значний перепад температур полімер у формі може перебувати одночасно у склоподібному, високоеластичному та в'язкотекучому станах. При контакті гарячого розплаву зі “холодною” стінкою відбувається його охолодження, і подальше заповнення форми відбувається всередині охолодженої оболонки полімеру. Тиск у формі також є неоднорідним.

Гомогенність матеріалу та стабільність його властивостей залежать від способу і тривалості заповнення форми. Заповнення має здійснюватися з максимальною швидкістю. Під час переміщення розплаву у порожнині форми виникають орієнтаційні напруги, особливо у тонкостінних виливках, причому на величину напруг впливають перепади тиску та температури. При низькому тиску або температурі може спостерігатися передчасне тверднення розплаву до того, як він заповнить всю форму.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2. Розробка технологічного процесу

Технологічний процес виготовлення виробів на полімерній основі із використанням різнофункціональних інгредієнтів побудований на виконанні наступних операцій:

- підбір та підготовка вихідних матеріалів (в'язучих, модифікаторів, наповнювачів);
- приготування формувальної суміші (дозування, змішування);
- формування виробів (пресування, заливка у форми, лиття під тиском тощо);
- термічна і механічна обробка, що відбувається за певними стадіями.

Технологія термічної обробки епоксикомпозитів є важливим етапом покращення їх експлуатаційних властивостей і суттєво впливає на такі характеристики, як міцність, термо- та теплостійкість, зносо- та корозійну стійкість. Основні фактори, що впливають на дані характеристики:

- швидкість нагріву покриттів при формуванні;
- час витримки при температурі нагріву;
- температура нагріву.

Швидкість нагріву визначає особливості структуроутворюючих процесів на початковій стадії зшивання полімерної сітки, рівномірність розподілу компонентів у системі, а також характер і величину внутрішніх напружень, що виникають у процесі формування. З експериментальних даних найбільш оптимальною для епоксикомпозитних матеріалів виявилась швидкість нагріву близько 5 °С за хвилину.

Температура полімеризації залежить від природи використовуваних полімерних компонентів і зазвичай на 5...15 % нижча за температуру їх термодеструкції. Важливу роль відіграє також характер твердника – низькотемпературний або високотемпературний. Використання

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

низькотемпературного твердника визначає специфіку процесу, але не обмежує його ефективність, що підтверджується експериментально.

Підвищення температури полімеризації сприяє додатковому зшиванню структурної сітки в'язучого та зменшенню вмісту гель-фракцій із 10...15 % до 2...8 %. Гель-фракції формуються з непрореагованих фрагментів мономерів та інших компонентів через обмежену рухливість молекулярних складових у неоднорідних системах, седиментаційні явища та інші внутрішні процеси.

На температуру полімеризації також впливає технологія отримання матеріалу – полімеризація у відкритому або замкненому просторі, можливість або відсутність подальшої механічної обробки, допустимий рівень залишкових внутрішніх напружень тощо. Загалом вона визначається сумісністю компонентів системи полімер–твердник та умовами проведення процесу.

Час витримки при температурі полімеризації залежить від таких основних чинників:

- товщина й геометрія заготовки та характер розвинутості її поверхні;
- температура нагріву (із збільшенням температури нагріву час витримки переважно зменшують);
- умови експлуатації майбутньої заготовки (із зростанням жорсткості умов час витримки також переважно зростає);
- співвідношення між енергетичними затратами та приростом функціональних показників [22].

Умови охолодження значною мірою впливають на довговічність та міцність епоксикомпозитів. Оптимальна швидкість охолодження забезпечує найкраще співвідношення між величиною залишкових напружень і когезійною міцністю матеріалу, що визначається характером хімічних зв'язків, дефектами структури та пористістю. Для більшості епоксидних полімерів, отриманих методом лиття, оптимальним є охолодження на

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спокійному повітрі, тоді як для високонаповнених і середньонаповнених прес-полімерів зазвичай застосовують охолодження разом із піччю.

Умови охолодження переважно залежать від наступних факторів:

- природи вибраного в'язучого і твердника;
- особливостей сумісності (термодинамічної, кінетичної, механічної) інгредієнтів (чим менш сумісні, тим м'якший режим);
- режимів нагріву (полімеризації) і витримки при температурі (чим жорсткіші попередні режими, тим бажаніший м'якший режим охолодження для зменшення появи напруг на попередніх етапах термічної обробки);
- структури полімерів;
- технології формування полімеру (при застосуванні операцій пресування швидкість охолодження вибирається меншою, ніж при литті під тиском тощо).

4.3. Технологічний процес формування захисних епоксикомпозитних покриттів

Покриття здатні ефективно захищати метал від корозії та мають комплексну будову, складаючись з декількох шарів і матеріалів, що відрізняються складом, структурою та властивостями.

Технологічні стадії формування комплексного покриття визначаються технічними вимогами до зовнішнього вигляду, умовами експлуатації та економічною доцільністю. Формування епоксикомпозитного покриття здійснювали наступним чином: на попередньо знежирену та механічно оброблену металеву поверхню наносили композицію товщиною 250–350 мкм. Тверднення шару проводили в камері високочастотної обробки при енергії електромагнітного випромінювання 170 Вт, з подальшим охолодженням на спокійному повітрі. Було визначено оптимальний температурно-часовий режим структурування покриттів на початковому

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

етапі, що забезпечує мінімальні внутрішні напруження в системі. Також встановлено максимальну товщину покриття, при якій досягаються високі технологічні та експлуатаційні характеристики.

Технологічний процес формування захисних епоксикомпозитних покриттів (табл. 4.1) включає заготівельну, формувальну, термічну та контрольну операції, а також етапи механічної обробки та маркування виробів.

Таблиця 4.1

Номер операції	Назва операції	Структура операції	Обладнання, матеріали
1	2	3	4
005	Заготівельна	<p>1 Просушити наповнювач у сушильній шафі при $453 \pm 5\text{K}$ протягом 1,5...2 год</p> <p>2 Просіяти порошок через сита</p> <p>3 Провести дозування компонентів</p> <p>4 Змішати епоксидно-діанову смолу з твердником</p> <p>5 Ввести в композицію наповнювач і перемішувати композицію</p> <p>15...20 хв</p>	<p>Сушильна шафа</p> <p>Набір сит, ГОСТ 6613-73</p> <p>Ваги, ГОСТ 19491-74</p> <p>Шнековий змішувач</p> <p>Шнековий змішувач</p>
010	Формувальна	<p>1 Підготувати поверхню заготовки для нанесення покриття</p> <p>2 Знежирити поверхню в місцях нанесення покриття</p> <p>3 Провести формування шару покриття</p>	<p>Шліфувальний папір</p> <p>Ацетон</p> <p>Фарбувальний апарат високого тиску "Фініш – 211"</p>

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4
015	Термічна	1 Ввімкнути СВЧ-камеру 2 Завантажити деталі в камеру і провести термообробку за наступним режимом: 10 с + охол. 1...2 хв+15 с + охол. 1...2 хв + 25 с + охол. 1...2 хв при енергії електромагнітного випромінювання 170 Вт. 3 Вийняти деталі та охолоджувати їх на спокійному повітрі	СВЧ-камера
020	Контроль-на	1 Перевірити покриття на відповідність розмірам згідно креслення та на відсутність дефектів	Мікрометричний нутромір, штангенциркуль, лупа
025	Шліфуваль-на	1 Прошліфувати до відповідного розміру 2 Проконтролювати розміри	Шліфувальний верстат Штангенциркуль
030	Маркування	1 Нанести відповідне клеймо	Фарба, трафарет

Приготування формувальної маси включало підготовку наповнювачів та їх поетапне введення у композицію. Наповнювачі перед застосуванням просушували в сушильній шафі на повітрі при 473 ± 5 К протягом 1,5...2 год, після чого зберігали в герметичній тарі. Перед приготуванням композицій порошки просіювали через сито з відповідними розмірами отворів.

Далі наповнювачі дозували відповідно до складу, змішували та поміщали у металевий контейнер. В епоксидно-діанову смолу ЕД-20 у відповідному співвідношенні вводили твердник ПЕПА. Після отримання однорідної маси додавали підготовлені наповнювачі та перемішували систему протягом 6–10 хв при мінімальній швидкості, щоб уникнути надмірного нагріву композиції.

На основі об'ємних співвідношень між в'язучим та наповнювачами визначали їхні вагові пропорції та кількість маси на одиницю виробу. Кузов

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

транспортного засобу завантажували в камеру високочастотної обробки та проводили термічну обробку за режимом: попередній нагрів 10 с, подальший нагрів 15 с і завершальний нагрів 25 с при енергії електромагнітного випромінювання 170 Вт, з 1...2 хв охолодження після кожного етапу.

На фінальному етапі виробу контролювали на відсутність дефектів та відповідність типорозмірам, маркували та транспортували до місць зберігання.

4.4. Виникнення браку в епоксикомпозитах

При правильному підборі режиму лиття, конструкції виробу та форми відлиті деталі мають гладку поверхню. Порухення режиму лиття або невірне проектування форми чи виробу призводить до появи дефектів на поверхні.

У деяких випадках на ливарних виробках виникають сріблясті або темні смуги. Сріблясті смуги з'являються через залишкову вологу, що не була видалена під час пластифікації в нагрівальному циліндрі, тоді як темні смуги формуються при перегріванні матеріалу. Дрібні нерівності поверхні пов'язані з недостатнім тиском під час лиття. Вироби іноді мають викривлення, яке залежить від структури полімеру, конструкції виробу, складу композиції, режиму переробки, умов охолодження та типу литтєвої машини.

Полімерні матеріали повинні відповідати таким вимогам:

- мати достатню механічну міцність, здатність протистояти механічним навантаженням;
- бути хімічно стійкими до компонентів продукції;
- бути економічно вигідними та технологічними;
- мати низьку вартість сировини порівняно з металом та склом;
- відповідати санітарно-гігієнічним нормам;
- відзначатися декоративними та естетичними властивостями.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Спеціальні вимоги до полімерних матеріалів включають:

високий ступінь герметичності (непроникність для води, газів, пари та ароматичних речовин, стійкість до мікроорганізмів, висока теплостійкість);
здатність забезпечувати стійкі з'єднання (шви) при виробництві тари, що зберігають герметичність у широкому діапазоні робочих температур;
низьку світлопроникність для підвищення захисних властивостей пакувальних матеріалів.

Типові дефекти виробів із пластмас:

апельсинова шкурка – нерівність поверхні, що нагадує шкірку апельсина;
газова пора – чітко обмежена опуклість, заповнена газом;
хвиляста поверхня;
короблення – деформація виробу після виймання з прес-форми;
мутність – зниження прозорості оптично прозорого виробу;
непропавлення – наявність згустків матеріалу всередині виробу;
нерівномірний глянець – матові плями на поверхні;
нерівномірна матова поверхня – глянцевої плями на матовій поверхні;
підгортання – кольорові плями на поверхні;
раковина – порожниста западина;
сріблястість – локально пластично деформована ділянка, схожа на тріщину без розділення матеріалу;
сколення – відшарування невеликих шматків пластмаси;
сліди витікання – нерівномірні сліди від витікання пластмаси;
слиудоподібна поверхня – луската поверхня, схожа на слиуду;
сухе місце – оголений наповнювач, непропитаний полімером;
тріщина – локальний поділ матеріалу;
холодний стик – сліди підтікання розплаву;
подряпина – невеликі заглибини на поверхні;
недопресування – дефект через недостатнє заповнення форми;
розшарування – відділення шарів один від одного.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі досліджено, що формування епоксикомпозитних матеріалів під дією СВЧ-нагрівання дозволяє підвищити їхні механічні характеристики та ступінь структурування. Експериментально встановлено, що під впливом енергетичних полів відбувається інтенсивне поглинання та локалізація енергії, що спричиняє випаровування летких компонентів композиції. Підвищення температури прискорює реакції полімеризації, внаслідок чого зростає в'язкість системи та блокується газове включення в об'ємі матеріалу, що призводить до формування пористої структури об'ємних зразків.

Встановлено, що у полі СВЧ процес формування сітчастого епоксиполімеру відбувається значно швидше, ніж у термічному полі. Структурування під дією ІЧ-випромінювання забезпечує вищий вміст гель-фракції порівняно зі ступінчастим термічним нагріванням, що свідчить про здатність ІЧ-хвиль проникати в об'єм матеріалу та одночасно утворювати хімічні зв'язки в усьому об'ємі епоксиполімеру.

Експериментально показано, що композити, наповнені порошком оксиду алюмінію та структуровані в полі СВЧ, мають високий вміст гель-фракції ($G = 98,8 \%$), що свідчить про посилення взаємодії епоксиполімеру з поверхнею частинок наповнювача. Епоксикомпозити з фторопластовим наповнювачем характеризуються найнижчими внутрішніми напруженнями завдяки високій дисперсності наповнювача, що забезпечує рівномірний розподіл частинок та однорідність системи.

Низькі значення межі міцності при стисканні епоксикомпозитів, структурованих під дією ІЧ-випромінювання, зумовлені недостатнім тепловим впливом на полімеризаційні процеси систем, наповнених порошком фторопласту або оксиду алюмінію, що обмежує проникнення електромагнітних хвиль. Натомість епоксикомпозити з порошком заліза

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

мають вищу межу міцності при стисканні під час структурування в полі СВЧ та ступінчастої термічної обробки.

Отже, оптимізація температурно-часових режимів тверднення є ключовим технологічним етапом при розробці епоксикомпозитних матеріалів. Недостатній час структурування не забезпечує формування достатньої кількості хімічних зв'язків між макромолекулами матриці та частинками наповнювача, тоді як надмірна енергія зовнішнього поля може спричиняти руйнування зв'язків у композиті та збільшення внутрішніх напружень, що знижує механічні характеристики матеріалу.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Полімерні композиційні матеріали в ракетнокосмічній техніці: Підручник / Джур Є.О., Кучма Л.Д., Манько Т.А., Ситало В.І. – К.: “ Вища освіта ”, 2003. – 399 с.
2. Демура А.Л. Використання електромагнітного поля надвисокої частоти в технологічному процесі виготовлення виробів з полімерних композиційних матеріалів // Весник двигателестроения. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2006. – № 4. – С. 76–79.
3. Стухляк П.Д. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані енергетичними полями / П.Д.Стухляк, А.В.Букетов, І.Г.Добротвор. – Тернопіль, Збруч, 2008. – 210с.
4. Голотенко С. Фізико-механічні властивості захисних полімеркомпозитних покриттів, наповнених дисперсними наповнювачами, що підлягають обробці зовнішніми фізичними полями / Голотенко С. // вісник ТНТУ. – 2010. – Том 15. – № 3. – С. 23-29.
5. Букетов А.В., Сапронов О.О., Яцюк В.М. Дослідження властивостей і структури нанокompозитних епоксидних матеріалів. – Львів, 2014. – 124 с.
6. Букетов А.В., Сапронова О.О., Алексенка В.Л. Епоксидні нанокompозити: монографія. – Київ, 2015. – 198 с.
7. Фирса С., Мельник Л. Виготовлення композитних пластин на основі епоксидної смоли та вуглецевих/скломатних наповнювачів // Матеріалознавство. – 2018. – №2. – С. 45–53.
8. Ushkov V., Figovsky O., Smirnov V., Seleznev V. Fire-resisting composites based on polymer matrix. – Lviv, 2019. – 112 p.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Сиволожський О.А. Електродинамічні характеристики полімерних композитів з гібридним наповнювачем: дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 2023. – 156 с.

10. Кашицький В.П., Савчук П.П., Малець В.М., Садова О.Л., Гулай О.І. Cyclic structuring of epoxy polymers under the influence of microwave electromagnetic radiation. – Львів, 2020. – 98 с.

11. Попович В., Кондир А., Плешаков Е. та ін. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Практикум: Навч. посібник. – Львів: Світ, 2009. – 552 с.

12. Дослідження міжмолекулярних взаємодій у епоксидних композитах з дисперсними оксидами. – Харків, 2017. – 87 с.

13. Epoxy Composites Filled with Natural Calcium Carbonate. – Kyiv, 2019. – 45 p.

14. Identifying the properties of epoxy composites filled with the solid phase of wastes from metal enterprises. – Lviv, 2019. – 52 p.

15. Research of electrical properties of epoxy composite with carbon fillers. – Kharkiv, 2017. – 61 p.

16. Designing tribotechnical epoxy composite materials reinforced with chopped fibers and modified with silicon organic varnish. – Kyiv, 2024. – 79 p.

17. Strength and chemical resistance of composites based on epoxy resins, filled with gypsum in the original and water-hardened forms. – Lviv, 2020. – 88 p.

18. Дослідження структуроутворення епоксидних полімерів під дією СВЧ та ІЧ полів. – Київ, 2021. – 104 с. Copson D. A. Microwave heating.— Avi, Westport, CT, 1975.

19. Jassie L. B., Kingston H. M. Microwave dissolution in closed vessels under elevated temperature and pressure.— Pittsburgh, 1985, Paper № 108A.

20. В.Попович, А.Кондир, Е. Плешаков та ін. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Практикум: Навч. посібник. – Львів: Світ, 2009. – 552 с.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці. – 2004. – 318 с.

22. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень
ДСНЗ.3.6.042-99.

					MP 0425.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		